

DetECCIÓN de bocaminas

abandonadas mediante tomografía eléctrica en la Sierra de Guadarrama, Madrid

Las posibilidades de detección de galerías de mina abandonadas mediante la técnica geofísica de la tomografía eléctrica son cada vez más elevadas e interesantes. La zona de investigación elegida ha sido la Sierra de Guadarrama donde hay, desde hace muchos años, minas históricas abandonadas que beneficiaban diversos metales. El trabajo se enmarca dentro de la tesis doctoral de Luis Jordá, sobre el estudio histórico y patrimonial de la minería de los metales en la Sierra de Guadarrama.

TEXTO | Luis Jorda Bordehore (rudnikconsultores@hotmail.com), Octavio Puche Riart (octavio.puche@upm.es), Luis Felipe Mazadiego Martínez (luisfelipe.mazadiego@upm.es)

Palabras clave
Bocaminas, tomografía eléctrica, Sierra de Guadarrama

Aún existiendo numerosas publicaciones sobre detección de cavidades por métodos eléctricos, desde nuestro punto de vista hay que ser muy cauteloso. Es cierto que se publican los casos más espectaculares, pero la realidad puede jugar a veces malas pasadas, por presencia de capas muy resistivas que pueden “parecer” signatures de cavidades. Es siempre aconsejable un buen conocimiento geológico de la zona y utilizar combinaciones de varios métodos con sondeos. El objetivo del trabajo es probar el alcance de un método geofísico en zonas donde es conocida la presencia de las galerías.

Se pretende detectar la posición de galerías de mina mediante perfiles geofísicos desarrollados sobre la superficie del terreno, perpendiculares al eje de las mismas.

Es frecuente, tras más de cien años de abandono de una explotación de una galería, que ésta quede recubierta por desprendimientos del emboquille, a veces provocados para evitar el acceso peligroso a las labores de interior. La mejor manera de detectar una galería enterrada no es en el propio emboquille, sino llevar a cabo perfiles perpendiculares, unos metros pasado el colapso, donde esta se encuentra o bien anegada o bien llena de aire, pero no rellena de cascotes. En las figuras 1 y 2 se pueden ver sendos



Figura 1 y 2. Subsidiencias producidas a favor de galerías mineras en Ohio. (Fuente: http://www.dnr.state.oh.us/geosurvey/geo_fact, 2006)

Es siempre aconsejable
un buen conocimiento
geológico de la zona
y utilizar combinaciones
de varios métodos con
sondeos

hundimientos del terreno a favor de subsidencias mineras de galerías y cámaras vacías en Ohio, Estados Unidos.

El colapso de galerías, pocillos y cámaras mineras es uno de los riesgos geotécnicos más importantes en proyectos

desarrollados en pueblos y en comarcas mineras, tal y como se muestra el hundimiento acaecido en Gargantilla de Lozoya, Sierra de Guadarrama (figura 3).

Ventajas de la aplicación de métodos geofísicos

Se pueden detectar galerías mediante sondeos, pero una de las mayores ventajas de la investigación geofísica, frente a las técnicas “intrusivas”, es que la información obtenida cubre grandes superficies o volúmenes de terreno a un coste menor. Esta consideración es crucial en terrenos susceptibles de sufrir subsidencias. Ello es debido simplemente a la ley de probabilidades, pues es muy difícil dar con una pequeña cavidad o el inicio de un socavamiento únicamente con sondeos o calicatas. Mediante las técnicas geofísicas “escaneamos” el terreno en búsqueda de anomalías, y sólo



Figura 3. Hundimiento de más de 4 m de profundidad en la mina San José, de Gargantilla de Lozoya (Sierra de Guadarrama, Madrid). Se produjo en 2004, asociado a una chimenea de ventilación del primer nivel, y relativamente cerca de una urbanización de chalets.

cuando el objetivo es relativamente grande frente a la profundidad de investigación los resultados marcan claramente su desarrollo. En la mayoría de los casos se obtienen mapas de anomalías que delimitan las zonas favorables y desfavorables, reduciendo enormemente el coste de las campañas de sondeos y aumentando las posibilidades de detectar adecuadamente las cavidades y minas.

Según Hobson (1992), la probabilidad de encontrar un objetivo de 10 m³ utilizando

15 muestreos en un terreno de 0,5 hectáreas es del 3%. Esa cifra desciende a un 1,7% con 85 puntos de muestreo en una parcela de 5 hectáreas.

En general, los métodos geofísicos tratan de la identificación de anomalías, donde se producen cambios en las propiedades físicas. Estos cambios pueden estar provocados por variaciones en el suelo o la roca (variaciones litológicas, estructuración o densidad de fracturas), o ligados a las denominadas anomalías extremas (que incluyen cavidades vacías o parcialmente rellenas de aire, agua o suelos) o cambios causados por variaciones temporales del nivel freático (y dentro del cual incluimos plumas de contaminación y las intrusiones salinas marinas). Para saber si un método geofísico es aplicable o no para detectar las variaciones de los parámetros físicos, hay que tener en cuenta diversos factores:

- La profundidad de investigación requerida.
- La resolución lateral y vertical que se necesita para detectar la anomalía. Ésta, tal y como mostraremos más adelante, es recomendable simular antes en gabinete.
- El contraste entre las propiedades físicas de los objetivos y el medio circundante. Es decir, si se va a producir o no una anomalía. Este punto también podemos simular en gabinete o tomar ciertas gráficas empíricas.
- El ratio de la señal y el ruido del método en el sitio que aplicamos (se incluyen las notables limitaciones de muchos métodos en medios urbanos³).

En la tabla 1 se comparan las aplicaciones de dos métodos geofísicos muy diferentes como son el georrádar y la tomografía eléctrica.

Introducción a la tomografía eléctrica

El equipo empleado en las prospecciones que se presentan en este artículo es un resistímetro Syscal Kid Swich de 24 electrodos, de la casa Iris Instruments (Orleáns, Francia). La separación máxima de electrodos, y con ello la profundidad de investigación, esta limitada por la potencia del aparato, y su rango óptimo esta entorno a los 0-12 m de profundidad. En ese rango, en una campaña ordinaria con dispositivo dipolo-dipolo en un perfil de 2 m de espaciado (48 metros de longitud) alcanzaremos una profundidad de investigación de 7-9 metros (según litologías); en el caso de existir una cavidad de 2x2 metros podemos llegar a tener más de 4 puntos de medida "dentro" de la misma. La calidad de la señal geofísica en este caso es excelente³.

Ejemplos clásicos de utilización de estas técnicas son el caso de cavidades⁴, rocas saturadas⁵, zonas con diques filonianos o discontinuidades, cambios bruscos laterales de facies, fallas⁶, y en general litologías diferentes con suficiente contraste eléctrico⁷. Las zonas de alteración y los vertidos pueden tener signatures geofísicas características.

El método "eléctrico" consiste en introducir una corriente eléctrica continua en el terreno a través de dos electrodos de corriente. Se mide el voltaje mediante otro par de electrodos, también en superficie. A partir del valor de la corriente inyectada y del voltaje medido se obtiene la resistividad aparente del subsuelo (figura 4). Cada tipo de material presenta un rango de resistividad más o menos característico. Las cavidades vacías (llenas de aire) presentan una resistividad aparente que tiende al infinito. Los terrenos saturados son

¹ Esa era la dimensión de la cavidad y del volumen de hormigón ciclópeo que la rellenó en un trabajo realizado mediante tomografía eléctrica en Navalcarnero. Se trataba de una cavidad para almacenamiento de vinos de más de cien años de antigüedad y que no fue detectada en el estudio geotécnico con varios penetrómetros y sondeo. La parcela tenía solamente 1.600 m².

² Los métodos más aplicados recientemente en zonas urbanas, en función del objetivo, son el georrádar y el análisis de las ondas sísmicas superficiales y sísmica pasiva.

³ En la aplicación de los métodos eléctricos, la principal premisa es la existencia de contraste de resistividades entre los materiales o estratos que se investigan. Si se dan las condiciones teóricas básicas, es posible detectar diferencias de conductividad geo-eléctrica que permiten elaborar cartografías de tipo geológico y columnas estratigráficas. Cuanto mayor sea el contraste de resistividades (o el opuesto de conductividades) de los materiales, mayor será la resolución.

⁴ Una cavidad vacía cuya resistividad frente al encajante tiende a infinito se distingue bien del entorno o de cavidades rellenas de limos o arcillas.

⁵ El nivel freático es conductivo y supone una caída brusca de la resistividad.

⁶ Más que detectar la falla propiamente, se detectan dos materiales diferentes enfrentados.

⁷ Típicamente sucesiones arcilla /arena /yeso y calizas y rocas intrusivas infrayacentes.

Cavidades vacías (resistivas)	Ejemplos típicos		Georradar	Tomografía eléctrica
	antrópicos	naturales		
A menos de 10 m	Canteras subterráneas, bodegas, minas “vacías”.	Cavidades cársticas carbonatadas o en yesos.	Sí, si el medio es eléctricamente resistivo.	Por nuestra experiencia, resulta espectacular cuando el diámetro de la cavidad es semejante a la profundidad de su techo. A medida que la cavidad disminuye es frecuentemente una anomalía difícil de interpretar, más bien una “zona favorable a” presencia de cavidades.
A más de 10 m			Sí, pero muy influido por el tipo de antena y de la resistividad del terreno, en algunos casos hasta 30 m aunque no es frecuente que alcance objetivos a más de 15 m. Algunos casos registrados en minas, o coqueras en zonas graníticas.	No es frecuente detectar propiamente la cavidad salvo que esta sea muy grande.

Cavidades conductivas	Ejemplos típicos		Georrádar	Tomografía eléctrica
	antrópicos	naturales		
A menos de 10 m	Canteras subterráneas, bodegas, minas, inundadas o rellenas de arcilla.	Fracturas rellenas, bolsadas conductivas (arcillas, zonas de humedad).	Si el medio encajante es eléctricamente resistivo.	Habitualmente excelentes resultados, siempre y cuando la cavidad esté rodeada de un medio resistivo.
A más de 10 m			Es posible pero hemos encontrado pocos casos en la bibliografía.	Si el volumen de la cavidad es importante y si es posible desplegar en superficie un dispositivo de adquisición tan largo.

Tabla 1. Clasificación de la aplicabilidad de dos métodos geofísicos de superficie en la detección de cavidades: georradar y la tomografía eléctrica. Conviene tener presente que pueden darse situaciones que influyan favorable o desfavorablemente en la aplicabilidad.

altamente conductores y, por tanto, presentan baja resistividad.

Según la posición de los electrodos la corriente penetra más o menos en el terreno. En la práctica, se extiende una línea de más de 24 electrodos que son seleccionados de cuatro en cuatro por el equipo de campo (resistivímetro). De esta manera se obtienen gran número de puntos de resistividades aparentes. Clásicamente se ha empleado el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), de gran éxito en la detección de transiciones litológicas y detección de niveles freáticos en la vertical de un punto; sin embargo, con los modernos equipos multielectrónicos, es un equipo totalmente superado por la tomografía para estudios de índole geotécnica.

Los datos se han filtrado y ordenado mediante el programa PROSYS de la casa IRIS INSTRUMENTS y se han interpretado e invertido mediante RES2DINV de GEOTOMO-software (Malasia).

La tomografía eléctrica es la técnica por la cual se miden la resistividad en numerosos puntos de un perfil y se interpolan e interpretan los datos para hacer un perfil de resistividad que permite hacer un verdadero corte eléctrico del terreno. Si las condiciones son adecuadas, es una herramienta muy potente para llevar a cabo correlaciones entre resistividad y tipo de material en terrenos ocultos.

Se sitúan al mismo tiempo un gran número de electrodos en el terreno siguiendo una alineación. Se conectan a un multicable el cual, a su vez, está unido a un resistivímetro y un selector de electrodos. Debido a la gran cantidad de datos que se obtienen al combinar de cuatro en cuatro los puntos conectados, se necesita del apoyo informático en campo (normalmente un ordenador portátil), tal y como se muestra en la figura 5. El desarrollo de programas cada vez más potentes permite tomar unos datos de mayor calidad. Se pueden comprobar los electrodos que están

incorrectamente colocados y, el gran número de combinaciones y repeticiones que se pueden hacer, dan una serie de valores muy fiables. Un corte eléctrico básico puede obtenerse directamente en campo, lo que permite un control de calidad de las medidas obtenidas.

Fundamentos de la inversión

Una vez obtenidas las medidas en campo, es necesaria una inversión (figura 6). Este procedimiento consiste en realizar iteraciones que acerquen nuestro modelo del terreno al modelo real. El paso clave está en la construcción de sucesivas secciones geo-eléctricas, que se comparan con la obtenida en el campo. El fin del proceso iterativo será en el momento en que simulemos una toma de datos (no sobre el campo sino sobre la sección que hemos creado) y cuyo resultado sea lo más parecido posible a los datos del campo. Es el llamado *error RMS* de tomografía y es un punto crítico del trabajo de interpretación.

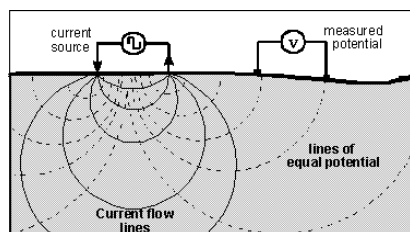


Figura 4. Proceso de medida de un dispositivo tetraelectrónico. A la izquierda, emplazamiento de los electrodos de corriente; a la derecha, electrodos de medida de potencial (en la imagen se muestra un dispositivo dipolo-dipolo). En trazo continuo: líneas de flujo de corriente. En trazo discontinuo: líneas equipotenciales

Profundidad de investigación e índice DOI (depth of investigation)

La profundidad de investigación que se obtiene varía mucho según la litología pero puede estar en un rango de valores de la tercera a la cuarta parte de la mayor abertura de electrodos que empleamos. Sin embargo, resulta imprescindible en muchas campañas definir con la mayor precisión posible esa profundidad de investigación para cada apertura del dispositivo, así como definir qué partes del perfil proporcionan información veraz y cuál no. No olvidemos que un equipo de estas características siempre mide “algo”. Debemos responder a la pregunta: ¿lo que estamos midiendo tiene realmente relación con el subsuelo y sus variaciones en profundidad, o es un mero artificio introducido por el proceso de medida y tratamiento?

El concepto de “profundidad de investigación” en las prospecciones geoelectricas ya fue avanzado, en el año 1932, por Marcel y Conrad Schlumberger. Posteriormente ha sido ampliamente discutido y se han establecido numerosas formulaciones y revisiones de estas. Por ejemplo, Vejen, en 1938, definió la profundidad de investigación como la profundidad a la cual una capa fina horizontal provoca el máximo de contribución a la señal total medida en superficie. Roy y Amparo (1971) y Roy (1972) utilizan la misma definición anterior en estudios llevados a cabo sobre medios isótropos homogéneos. Roy

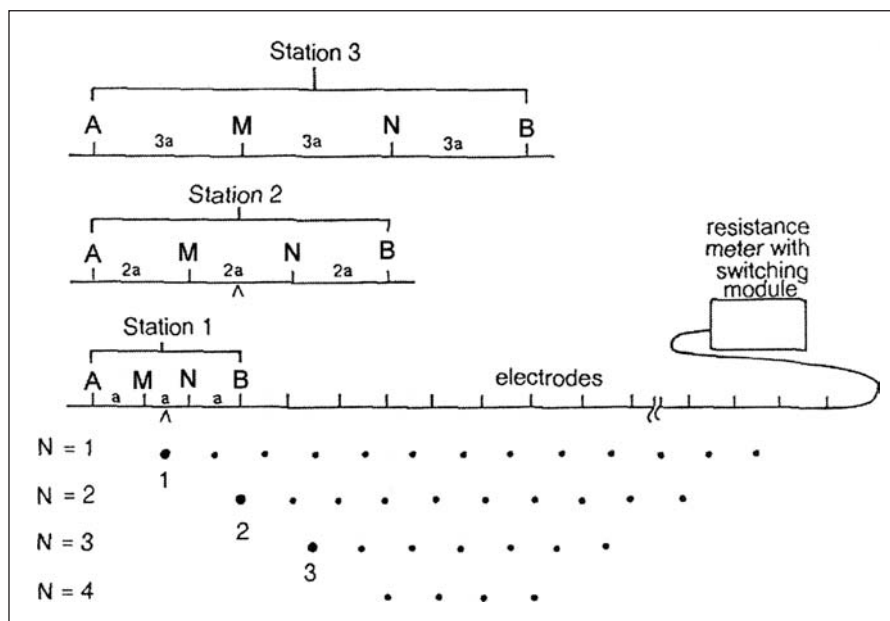


Figura 5. Disposición y secuencia de medidas en campo para tomografía eléctrica. Medición de los diferentes niveles o capas con un dispositivo de selección de electrodos automatizado.

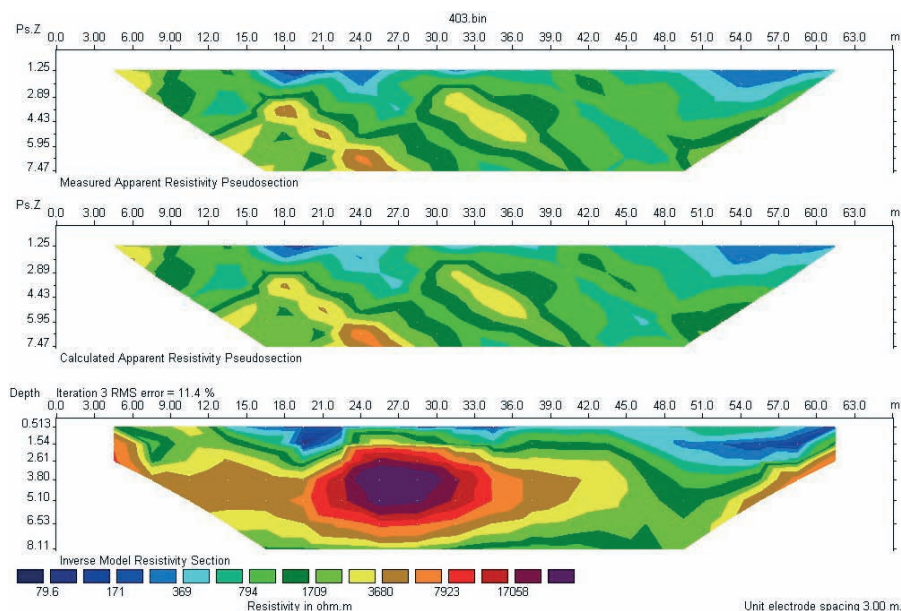


Figura 6. Ejemplo de una iteración en la inversión de una sección de tomografía eléctrica (programa RES2DINV). Arriba: resistividades aparentes medidas en campo sobre las que se ha interpolado para obtener unas zonas de resistividad. En el centro, resistividades calculadas, y en la parte inferior resistividades “verdaderas” al final de una iteración. El modelo de la imagen muestra un suelo, después un nivel de arenas, y en la parte izquierda la aparición de un nivel más competente. La imagen muestra una cavidad artificial en yesos en las minas romanas de Lapis Specularis, próximas a las ruinas de Segóbriga, Cuenca.

representó la contribución de esa capa fina a profundidades variables, a la intensidad de la señal recibida para diferentes tipos de dispositivos: wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. Marescot et al. (2003 y 2004), apuntan que la mayor parte de las aproximaciones tradicionales que calculan esta profundidad de investigación hacen uso del cálculo de la máxima señal obtenida con la profundidad de investigación o la profundidad de investigación media para un terreno homogéneo. Ello incluye a Roy

y Amparo, antes citados, y a Edwards (1977) para el segundo grupo.

Sin embargo, en suelos con heterogeneidades con fuertes contrastes de resistividad estos métodos no son aplicables para calcular la profundidad de investigación (Marescot y Martínez Pagan, 2004). Dentro de este tipo de terrenos incluimos la mayor parte de las aplicaciones geotécnicas de la tomografía eléctrica, tanto en ingeniería civil como en minería: detección de cavidades y

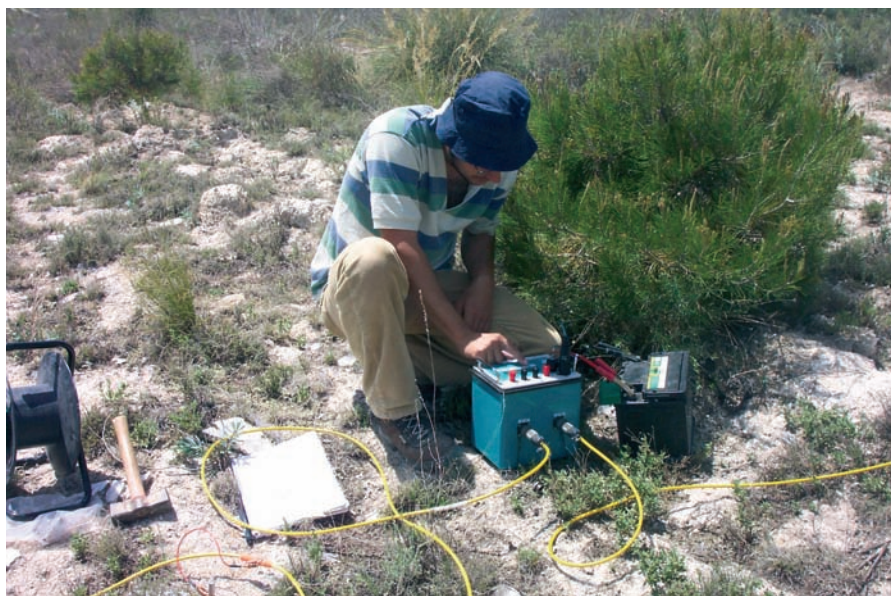


Figura 7. Imagen del equipo de registro empleado en la investigación.

El método desarrollado y propuesto por Oldenburg y Li (1999) consiste en establecer un parámetro denominado índice DOI (*Depth Of Investigation*)

manifestaciones cársticas diversas, minados antiguos, galerías y vías de agua, sucesiones de fallas, etc. Se tratan todos ellos, de casos con fuertes contrastes y gradientes. Algunas de las aplicaciones clásicas presentan variaciones más suaves o modelos más sencillos como son las de capas horizontales.

El método desarrollado y propuesto por Oldenburg y Li (1999) consiste en establecer un parámetro denominado índice DOI (*Depth Of Investigation*)⁸. Se llevan a cabo dos inversiones sobre el mismo grupo de datos de campo obtenidos, empleando cualquier programa comercial, pero utilizando diferentes valores de resistividad de partida para uno de los términos del algoritmo de inversión. Este término modificado es el del modelo de terreno en las condiciones iniciales de mínimos cuadrados del

algoritmo de 'quasi Newton' definido por Loke (1999). En una de las inversiones, este término se multiplica o divide por 10, generalmente. El valor DOI se establece de forma aproximada como una diferencia entre ambas inversiones. El valor del índice DOI se aproximará a cero en aquellas zonas de la sección geoelectrica en la que las dos inversiones se aproximen más. Por el contrario, un valor de DOI cercano a la unidad (máximo) indicará una separación entre ambas inversiones. Podremos considerar que en esas zonas de DOI elevado la sección muestra artificios y no se corresponde con la realidad, también nos sugerirá la profundidad a partir de la cual la señal eléctrica medida está lejos de representar "algo" del terreno.

Marscot y Pagan (2004) afirman en sus conclusiones que "el mapa DOI previene de

la sobre-interpretación, es decir, interpretar a toda costa todo lo que presenta la pseudosección obtenida por tomografía eléctrica. El mapa DOI también ayuda a explicar la presencia de anomalías erráticas a ciertas profundidades (...)"

En la (figura 7) puede verse el equipo empleado en la prospección: un Syscel Kid Swich de la casa Iris Instrument's.

Modelización previa. Programa RES2DMOD

Previamente a toda campaña geofísica es recomendable llevar a cabo una modelización. Es decir, se trata de crear modelos numéricos en los que introducimos *grosso modo* la geología que esperamos encontrar y podemos ver *a priori* el tipo de anomalía o las posibles heterogeneidades que se pueden presentar (fallas, cavidades). Este modelo nos permite "jugar" con las variables y optimizar el dispositivo de campo, o en su defecto, descartar un método.

En este caso, simulamos una campaña de adquisición geoelectrica mediante el programa RES2DMOD⁹ de modelización de perfiles de resistividad en dos dimensiones (2D) que emplea los métodos de diferencias finitas y elementos finitos. El programa puede desarrollar modelos sintéticos que simulan adquisiciones de campo en modo Wenner ($\alpha\beta\gamma$), dipolo-dipolo, polo-dipolo y Wenner-Schlumberger.

El programa *calcula la sección de resistividad aparente (figura 8 superior)* que obtendríamos en una campaña de análogas características, para un modelo de resistividad del subsuelo que configura el propio usuario (*figura 8 inferior*), con la ayuda de una interfase muy asequible. Resulta pues muy rápido para decidir los dispositivos y ver a grandes rasgos los resultados que pueden aparecer¹⁰. Es decir,

⁸ Depth Of Investigation se traduciría literalmente como Profundidad de Investigación. Así que estaríamos hablando de un "Índice de Profundidad de Investigación".

⁹ Se trata de un programa libre, cortesía de M.H. Loke (1999) creador del conocido programa de inversión RES2DINV y uno de los padres de la teoría y práctica de la inversión aplicada a los métodos eléctricos en dos y tres dimensiones. Ambos programas (este último en versión demo) puede descargarse en las páginas de los principales fabricantes de equipos geoelectricos, por ejemplo IRIS y ABEM.

¹⁰ Debemos interpretar estas secciones con precaución, pues la geología real nunca es tan sencilla como el modelo. Es cierto que podemos complicarlo, pero incluso en zonas conocidas hay multitud de variables que hacen que la sección geoelectrica se escape de lo esperado. Existen sin embargo contextos "de libro" como son ciertas fallas, coberteras alteradas sobre sustratos competentes, cavidades en terrenos muy resistivos, etc., en los que los modelos teóricos son asombrosamente semejantes a la realidad. Y el termino "tomos" (sección) adquiere su verdadera acepción.

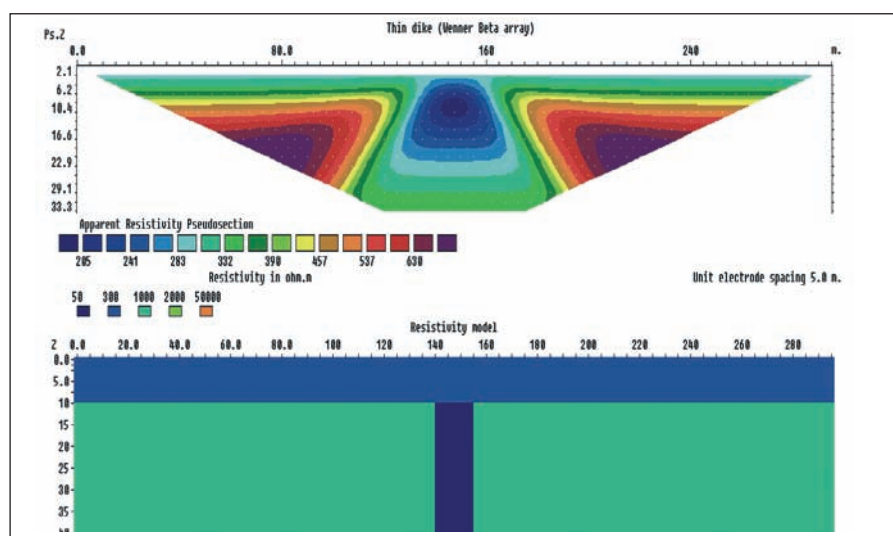


Figura 8. Modelo de falla 0 anomalía vertical conductiva. Modelo sintético con el programa RES2DMOD. En la sección inferior se muestra el modelo geoelectrico del terreno que define el usuario (una falla rellena de material conductor o un dique alterado). Sobre esta sección se muestra un corte de resistividades aparentes generada por el programa; sería pues como simular una adquisición de campo en la superficie del modelo. Como se aprecia, se trata de una sección en resistividades aparentes que deberíamos posteriormente "invertir" mediante RES2DINV y llegar a un modelo lo más parecido a la imagen inferior (Cortesía de H.M. Loke).

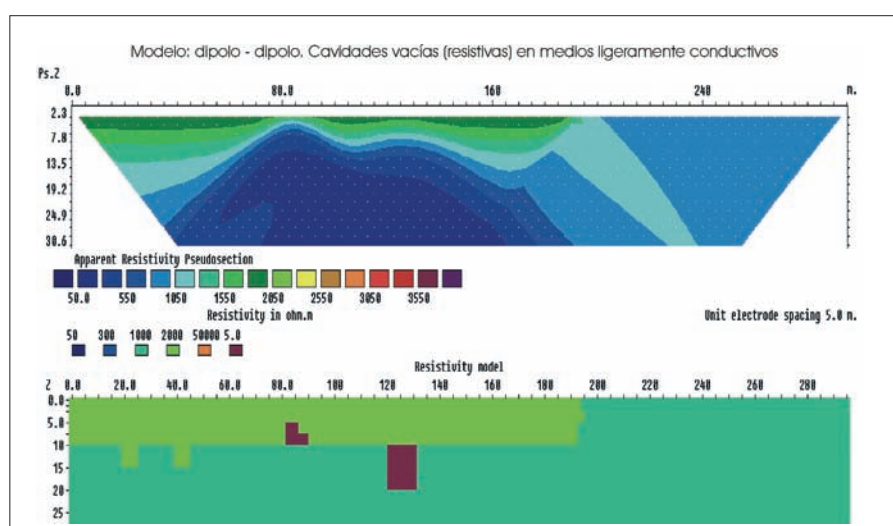


Figura 9. Cavidades conductivas (5 ohm.m) en medio resistivo (RES2DMOD) que pudieran ser cuevas, vías de agua o galerías de mina anegadas por el agua y/o material arcilloso. El encajante es muy resistivo (2.000 ohm.m) que puede representar una caliza, marga yesífera o un gneis parcialmente meteorizado. Se trata de una situación de anomalía muy favorable en el que detectamos perfectamente las anomalías incluso en un perfil en resistividades aparentes como repuntes en la capa superior. Ambas cavidades tienen un diámetro igual a la profundidad de su techo.

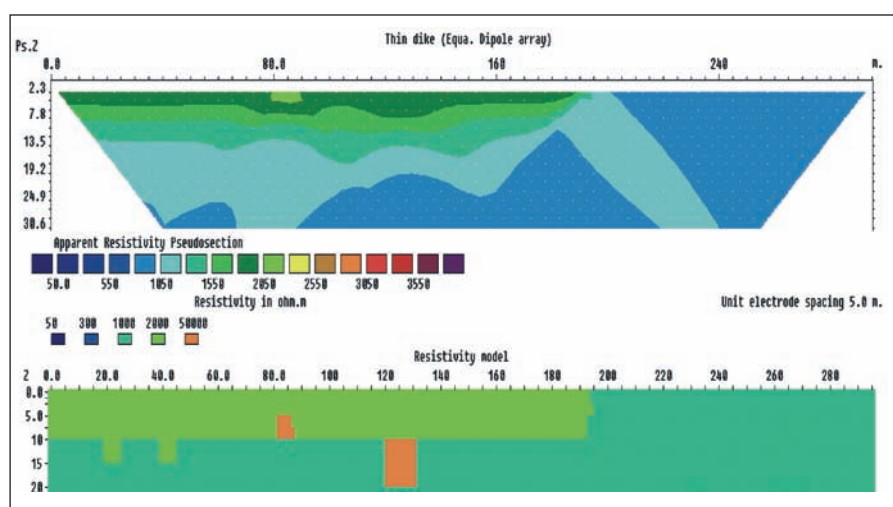


Figura 10. Cavidades vacías en medio resistivo (modo dipolo-dipolo) (RES2DMOD). Resistividad tendiendo al infinito (50.000 ohm.m). Como se aprecia la anomalía en perfiles aparentes es menos nítida, como cabría esperar. Las líneas de corriente tienden a canalizarse en las zonas de menor resistividad por encima y por debajo de la cavidad.

Estas secciones aparentes, archivadas en formato .dat pueden ser tratadas posteriormente por un programa de inversión tal y como RES2DINV

creamos secciones sintéticas, sin necesidad de ir al campo. Estas secciones aparentes, archivadas en formato .dat pueden ser tratadas posteriormente por un programa de inversión tal y como RES2DINV. Con este obtenemos la sección de resistividad real. Después de todo este proceso, la sección obtenida tras la inversión debe de asemejarse al modelo de partida creado por el usuario. Haciendo diversos tanteos, podemos ver qué modo (dipolo-dipolo Wenner, etc.) es el más adecuado y cuáles son los condicionantes del medio encajante y de la anomalía para poder detectarse correctamente.

Cavidades sintéticas. Resistivas y conductivas

En las figuras 9, 10, 11 y 12, se muestran varios modelos del subsuelo con cavidades, unas con resistividad tendiendo al infinito (valores de 100.000 ohm.m) que corresponden a aquellas vacías, así como otras con bajas resistividades, que simulan rellenas de un material conductor, como puede ser la arcilla o el agua. La disposición de las mismas en la sección modelo no es casual. Pretendemos modelizar situaciones y profundidades "favorables y desfavorables".¹¹

¹¹ Consideramos una situación claramente favorable cuando el diámetro de la cavidad es mayor o igual que la profundidad a la que se encuentra el techo de la misma.

En la Mina Cabeza Rullueco se persiguió averiguar “hasta donde se podía llegar”. Esta galería estaba oculta, hasta que en los años 1993-1994 las obras de ampliación de la carretera N-I dejaron al descubierto la boca de esta pequeña explotación

Resultados de perfiles eléctricos e inversión con RES2DINV

Mina Cabeza Rullueco (Robregordo, Madrid)

En la primera mina investigada se persiguió precisamente averiguar “hasta dónde se podía llegar”. Se eligió un objetivo *a priori* muy difícil, y siguiendo las indicaciones de la tabla inicial, se vio que no podía detectarse una galería de mina de 2 metros de altura situada a 8 metros de profundidad. La cavidad se encuentra exactamente al aplomo del punto de máxima cota del desmonte. En este caso (figura 13) el dispositivo está separado 3 m y con 9 niveles de investigación.

Esta galería de mina del siglo XIX, estaba oculta, hasta que hacia los años 1993-1994 las obras de ampliación de la carretera N-I dejaron al descubierto la boca de esta pequeña explotación de plata en un talud, en el punto kilométrico 86,700 (figura 14). En muchas comarcas mineras, “sorpresas” como esta se producen a menudo.

Minas Gargantilla de Lozoya, Madrid

De los numerosos pozos escombreras y vestigios mineros existentes en

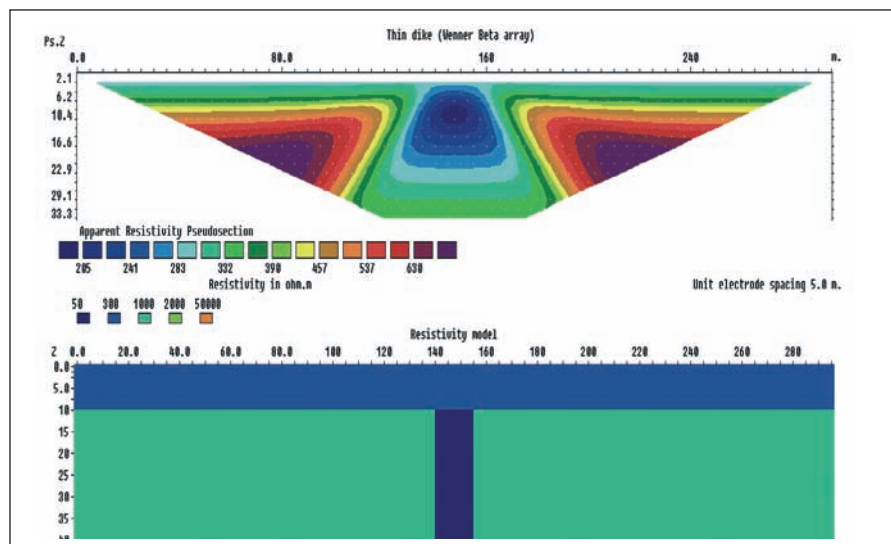


Figura 11. Caudales vacíos en medio resistivo (modo Wenner) (RES2DMOD). La imagen superior es un trabajo real que requirió de una modelización previa. Se trata de cavidades vacías en yesos. La resistividad aparente en tonos marrones marca la zona karstificada.

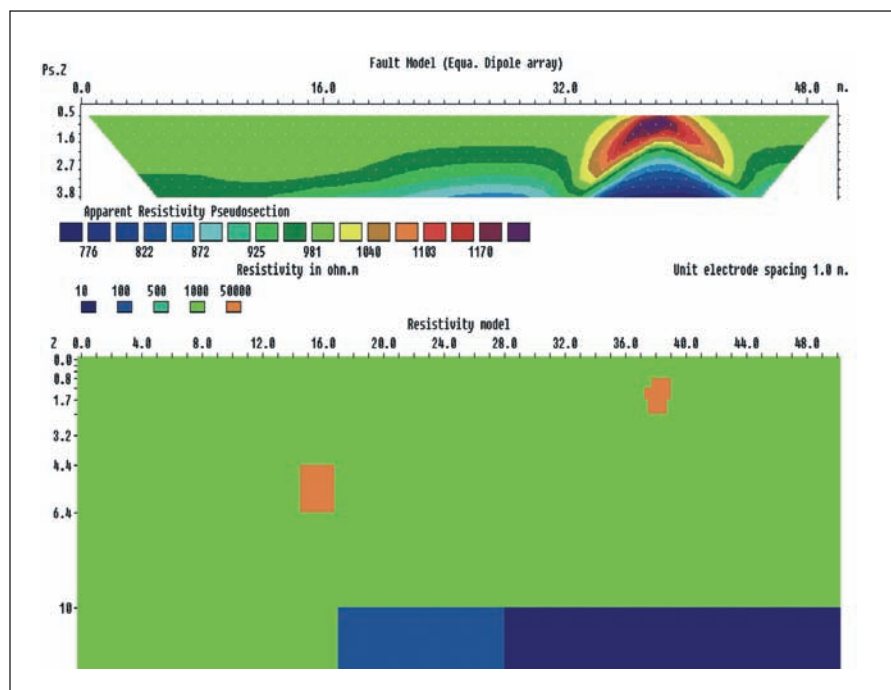


Figura 12. Caudales vacíos en medio resistivo con capa conductiva infrayacente (RES2DMOD). La imagen superior muestra una cavidad somera detectada pero no así la profunda. La selección de espaciado de electrodos y niveles de investigación no ha sido la correcta.

Gargantilla de Lozoya hemos seleccionado la única galería reconocible denominada mina Mirla. Se trata de unas de las zonas con mayor profusión de minas de la Sierra de Madrid y el Valle de Lozoya, donde precisamente se produjo el hundimiento que citamos al comienzo del artículo. La bocamina estudiada se encuentra a escasos metros del río Lozoya junto al desvío a Gargantilla y el puente ferroviario. El objetivo era estudiar la signatura de una galería completamente anegada por el agua. Realizamos el perfil a 4-5 m en la

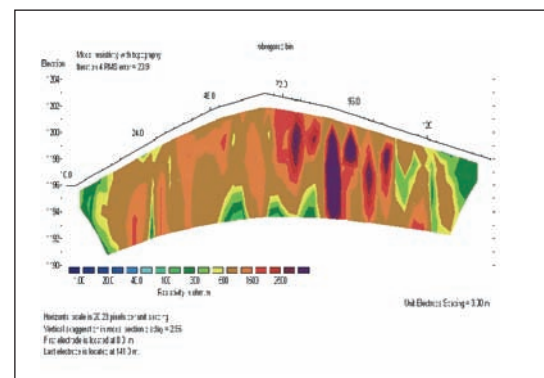


Figura 13. Perfil transversal, modo dipolo-dipolo y 3 m de espaciado (RES2DMOD). Sección geoelectrica de la colina que atraviesa la galería de la mina de Cabeza del Rullueco, en Robregordo (Madrid). La galería debería de haber aparecido en el punto x = 66 m.



Figura 14. Talud y bocamina en Robregordo. Detalle del emboquille de la galería en la trinchera de la carretera N-I: Madrid-Burgos

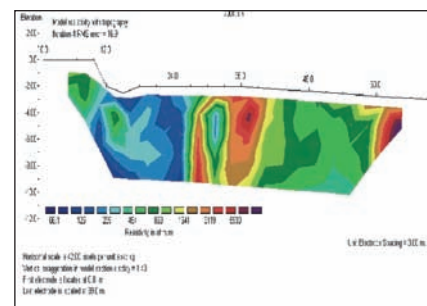


Figura 15. Perfil de tomografía eléctrica en Gargantilla de Lozoya (RES2DMOD). No se detecta exactamente la posición de la galería sino una anomalía asociada a ella, sobre la cota $x = 30$ m. El cambio de "colores" marca una importante zona de falla con un acuífero asociado.

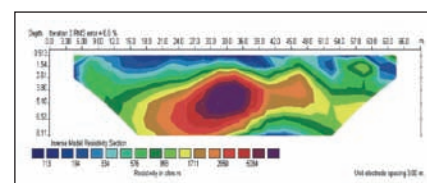


Figura 16. Perfil de tomografía eléctrica en Garganta de Lozoya (RES2DMOD). La imagen muestra perfectamente una galería vacía, marcada por una resistividad elevadísima, mayor de 10.000 ohm.m. Se aprecia, asimismo, en tonos "azules" los terrenos más limosos superficiales. Se trata del ratio perfecto para la detección exacta, encajante resistivo y cavidad vacía, 2 m de diámetro de la galería y a una profundidad de 2,5 m.

Las minas abandonadas constituyen en general un contexto muy favorable de aplicabilidad de los métodos eléctricos

vertical perpendicular al eje de la galería (figura 15).

Mina Fernandito de Garganta de los Montes, Madrid

Se trata de una de las minas más grandes e importantes de la Sierra de Madrid. Explotada en busca del cobre desde el siglo XIX, tuvo su época de esplendor en los años 1960. Se realizó un perfil en un camino próximo a la mina (figura 16), que debería de cortar la galería del primer nivel.

Minas de Cobre de Colmenarejo, Madrid

Las minas de cobre de Colmenarejo fueron explotadas de forma intermitente en el siglo XIX y principios del XX.

Hemos tomado para su estudio una galería de muy difícil acceso pero muy somera, que fue reutilizada como almacén y trinchera defensiva en la Guerra Civil. Se sitúa en los altos de Villanueva del Pardillo. En este caso, por tratarse de un emboquille con cobertera muy somera, se escoge un espaciado de electrodos de 1 m

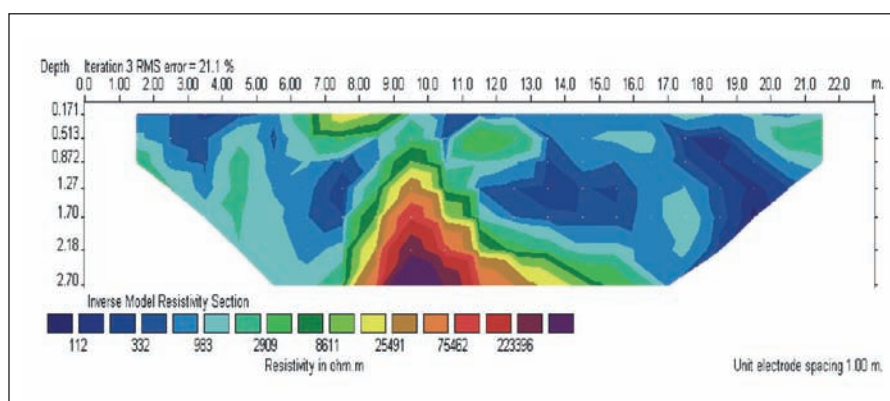


Figura 17. Galería de mina muy somera en Colmenarejo, Madrid (RES2DMOD). Sección geoelectrica con una separación de electrodos de 1,0 m.

(figura 17). La resolución es muy elevada, marcándose incluso una forma ojival de la galería, aunque se producen algunos artificios de interpolación, debido tal vez a un mallado no muy ajustado. La profundidad alcanzada es de 2,70 m.

Consideraciones finales

Las minas abandonadas constituyen en general un contexto muy favorable de aplicabilidad de los métodos eléctricos. El encajante es muy resistivo habitualmente, por lo que la penetración es muy buena. Por

otro lado, la anomalía es muy extrema: entre valores elevadísimos, tendiendo al infinito en cavidades vacías, a resistividades del orden de 10-50 ohm.m en las que están rellenas. El problema principal radica en el ratio diámetro de cavidad frente a su profundidad, tal y como apuntábamos en el inicio del artículo.

Las minas abandonadas constituyen un riesgo geotécnico y la tomografía eléctrica, en combinación con otras técnicas geofísica y con sondeos convencionales es una herramienta efectiva.

Bibliografía

- Alonso, R. (1916). Visita policía Minera a Garganta de los Montes. *Estadística Minera de España*. 1916, 299-302.
- Arlandi, M. (2005). Geofísica aplicada a la obra civil. Método geoeléctrico y sísmica de refracción. Casos prácticos. XII Curso de Geotecnia Aplicada. Universidad de Jaén 2005, 64 p.
- Calderón, S. (1910). *Los Minerales de España*. Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas. Madrid, 2 vol.
- Calvo, M. (2003). *Minerales y minas de España*. Museo de Ciencias Naturales de Álava. Vol. I Elementos. Vol. II Sulfuros y sulfosales.
- Doetsch, J. (1962). *Informe preliminar geofísico de la mina Fernandito. Garganta de los Montes (Madrid)*. Informe inédito 25 p. Archivo documentación hoja metalogenética Madrid. IGME.
- Edwards (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarisation. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- González del Tánago Chanrai, J. y González del Tánago del Río, J. (2002). *Minerales y minas de Madrid*. Comunidad de Madrid, Consejería Medio Ambiente. Mundi-Prensa, Madrid, 271 p.
- Hobson, D.M. (1992). Site investigation – making the most of your money. En: Forde, M.C. (ed.) *Proceedings 2nd International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land*, 151-158. Engineering Technics Press: Edinburgh.
- Jiménez, R., Jordá, L., Jordá, R. y Prado, P. (2004). Madrid. La minería metálica desde 1417 hasta nuestros días. *Bocamina*, 14, 50-89.
- Jordá, L. (2003). La minería de los metales en la Comunidad de Madrid. *Tierra y Tecnología*, 25, 63-68. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- Jordá, L. (2005). Geofísica somera aplicada a informes geotécnicos de pequeña escala: detección de cavidades por tomografía eléctrica. *Ingeopres*, 139, 20-24.
- Jordá, L. (2005). Técnicas geofísicas de reconocimiento del subsuelo: Georrádar y tomografía eléctrica. Casos Prácticos. *Subsuelo y Obra Urbana*. Agosto 2005, 34-43.
- Jordá, L., Puche, O. y Mazadiego, L. F. (2006). *La minería de los metales y la metalurgia en la Comunidad de Madrid (1417-1983)*. Instituto Geológico y Minero de España. 192 p.: il.
- Loke, M.H. (1999). User Manual RES2DMOD ver. 2.2. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite – element methods. 22 p.
- Mari, J.L., Arens, G., Chapellier y Gaudiani, P. (1998). *Geophysique de Gisement et de Génie Civil*. Technip.
- Marescot, L., Loke, M.H., Chapellier, D., Delaloye, R., Lambiel, C. y Reynard, E. (2003). Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the Depth Of Investigation index method. *Near Surface, Geophysics*, 1, 57-67.
- Marescot, L. y Martínez Pagán, P. (2004). Ejemplos de aplicación del índice DOI (Depth Of Investigation) en tomografía eléctrica. *Ingeopres*, 132, 40-45.
- Oldenburg y Li (1999). Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64, 403-416.
- Pescador Sesmero, S. y Rodríguez Soto, A. (2004). Reconocimiento del terreno mediante tomografía eléctrica por delante de la excavación de túneles. *Ingeopres*, 126, 86-95.
- Puche, O. y Mazadiego, L.F. (2003). Patrimonio Minero-Metalúrgico Madrileño. I Simposio Europeo sobre Minería y Metalurgia antigua en el Mediterráneo Occidental, 26. 5-7 mayo 2000, Serós, Lérida. SEDPGYM- IEI. Pobla de Segur, Lérida.
- Puche, O. (2003). Histoire des Mines dans la Péninsule Ibérique. En: M. Serrano Pinto, editor. *Proceedings of the 26th Inhigeo Symposium 2001*, Universidade de Aveiro, 39-49.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley.
- Roy (1972). *Geophysics prospecting*, 20, 329-340.
- Roy y Amparo (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.
- Sharma, V.S. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press, 475 p.
- VVAA (2004). *Detection de cavités souterraines par methods geophysiques*. Guide technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. París. 170 p.
- Woods, R.D. (1994). Geophysical Characterization of sites. ISSMFE Technical Committee n. 10. India. 141 p.
- Zhou, W., Beck, B.F. y Adams, A.L. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42, 922-928.